

嵌入作业协调的随机动态车队调度求解策略

李冰[†], 轩华

(郑州大学 管理工程学院, 郑州 450001)

摘要: 针对一类考虑站内装卸货作业协调的随机动态车队调度问题, 建立动态规划模型, 并在此基础上进行改进, 构建单参数动态重构模型和双参数动态重构模型, 进而设计3种单变量作用关系模型和3种双变量作用关系模型, 并给出分解控制参数获取方法. 最后通过仿真和实验研究表明, RM-SDCP模型和RM-DDCP模型可以得到比传统DP模型更高质量的解, 在RM-DDCP模型与RM-SDCP模型的性能比对中, RM-DDCP模型总体性能优于RM-SDCP模型.

关键词: 重构模型; 作业协调; 逗留时间; 作用关系; 控制参数

中图分类号: N945; TP11

文献标志码: A

Solving strategy for stochastic dynamic fleet scheduling with station operation coordination

LI Bing[†], XUAN Hua

(School of Management Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The dynamic program(DP) model of the stochastic dynamic fleet scheduling with station operation coordination is established. The dynamic program model is respectively transformed into the reconstruction model with single decomposition control parameters(RM-SDCP) and the reconstruction model with double decomposition control parameters(RM-DDCP). The single variable function correlation model and double variable function correlation model are obtained. The acquisition approaches of decomposition control parameters are given. Finally, the simulation and experiment study show that the RM-SDCP and the RM-DDCP can obtain higher quality solutions than the traditional DP model. The simulation experiments verify that the overall performance of the RM-DDCP is better than that of the RM-SDCP.

Keywords: reconstruction model; operation coordination; sojourn time; function correlation; control parameter

0 引言

物流运输业的迅速发展和应用需求增加了货物运输组织优化调度深度研究开展的迫切性. 物流运输生产调度一直是国内外专家学者关注的热点, 运输调度优化理论的研究取得了较多的研究成果. 但是, 目前所开展的相关研究多聚焦于独立运输移动资源的组织和调配问题, 忽略了与运输网络中货运站作业协调问题的结合.

近年来, 关于独立移动资源配置方面的研究工作开展得较多, 主要集中在:

1) 车辆调配研究. 侯玉梅等^[1]研究了带软时间窗

约束的整车物流配送车辆调配问题; 杨珍花等^[2]研究了不同车型组合下冷藏车多车型混合车辆调配问题; Battarra等^[3]研究了基于集群客户服务的车辆分配及路线问题.

2) 最佳规模配置研究. Xia等^[4]将燃料消耗量最省作为目标, 研究了班轮运输中船队规模、速度配置和货运量分配的集成处理问题; Koç等^[5]研究了一类带时间要求的多车型车队最佳规模配置与路线安排问题, 其目标是车队购置费用和使用费用最小化; Park等^[6]研究了一类集装箱船队最佳规模配置问题.

3) 车队综合管理研究. 李冰等^[7-8]分别研究了定

收稿日期: 2015-12-28; 修回日期: 2016-05-19.

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1604150); 教育部人文社会科学研究基金项目(15YJC630148); 郑州大学优秀青年教师发展基金项目(1421326092).

作者简介: 李冰(1976—), 男, 教授, 博士, 从事物流优化与控制等研究; 轩华(1979—), 女, 教授, 博士, 从事物流优化与控制等研究.

[†]通信作者. E-mail: lbing@zsu.edu.cn

周期和变周期动态车队调度问题; Tierney 等^[9]研究了班轮运输中的船队管理问题, 提出了模拟退火解决方法; Shi 等^[10]研究了一类考虑顾客选择服务水平的动态车队管理问题, 将其转化为多阶段动态网络, 进而设计分解算法进行求解.

运输作业过程协调与控制方面的研究主要集中在业务流程梳理层面, 较深入的研究成果不多. Meng 等^[11]系统剖析了集装箱货运船舶作业调度优化的研究现状和发展实际, 进一步研究了运筹学方法和计算机模拟技术在船舶调度作业模型构建和算法设计等方面的应用; Meisel 等^[12]研究了海港集装箱码头的泊位和起重机分配作业问题, 设计了一个三阶段解决方案; Yang 等^[13]设计了一套多准则决策支持方法来处理卡车作业运营管理问题; Nair 等^[14]研究了共享车辆系统的车队作业管理问题, 构建了一个随机混合整数规划模型, 进而设计算法进行求解; Zhao 等^[15]研究了一类运输作业调度问题, 设计了松弛条件引入车辆调度方案, 并将其应用于 D/G/C 排队模型, 仿真实验验证了方案的可行性和有效性; 赵艳艳等^[16]研究了铁路到站集装箱吊车作业优化, 建立了以倒箱次数最少为目标的多时段动态集装箱堆场箱位分配模型, 设计了遗传算法求解; 白紫熙等^[17]将高速铁路车站作业问题抽象成 Job-Shop 车间调度, 采用拉格朗日松弛算法进行求解; 边展等^[18]基于集装箱码头堆场操作实务, 以作业过程中翻箱次数最少为目标, 对堆场作业调度问题进行建模, 提出了两阶段混合动态规划算法.

综上所述, 脱离作业系统协调而独立探讨运输优化调度的研究思路如同无源之水、无本之木, 忽略了理论研究最终要解决实际问题的本质. 基于上述考虑, 本文从作业协调与运输组织调度协同优化的角度出发, 构建嵌入作业协调的动态车队调度模型, 并对模型进行改进重构, 设计单参数动态重构模型求解策略与双参数动态重构模型求解策略, 最后对不同求解策略的求解性能进行仿真验证. 结果表明, RM-SDCP 模型和 RM-DDCP 模型可以得到比传统 DP 模型更高质量的解, 在 RM-DDCP 模型与 RM-SDCP 模型的性能比对中, RM-DDCP 模型总体性能优于 RM-SDCP 模型.

1 模型的建立

1.1 问题描述

将计划周期 T 分为 H 个时段, 记 $T = \{\tau | t = 1, 2, \dots, H\}$ 为每个时段的长度. 在时段 t , 货运站 i 处产生去向为 j 的运输任务数为分布已知的随机变量 l_{ijt} , 车辆到达车站后需办理车辆装卸作业. 空驶车辆到达货运站后, 需排队进行装车作业(空来重去), 称为一次货物作业车. 满载重车到达货运站后, 首先要排队

进行卸载作业, 待卸载作业完成后, 又需排队办理装车作业(重来重去), 称为双重货物作业车. 当到达货运站的车辆过多时, 会产生大量的车辆排队等待时间, 降低站内工作效率. 通过车辆调度方案优化调整, 可以有效减少车辆在站停留时间, 及时完成车辆装卸货作业, 对提高货运工作效率有很大帮助. 载货重车创造的收益值为 a_{ij} , 空驶车辆产生的成本为 b_{ij} , 站内车辆排队等待装卸车的单位时间成本为 c_i , 计划周期开始时在各货运站处的空车分布 V_{i1} 已知, 现要制定车队调度方案, 使总收益最大. 引入如下参数与变量:

N 为运输网络的货运站点集合;

T 为计划周期, 由 H 个长度不等的时段组成, 记为 $T = \{\tau_t | t = 1, 2, \dots, H\}$, τ_t 为第 t 个时段的长度;

q_{ijt} 为时段 t 货运站 i 处产生的目的地为货运站 j 的运输任务数, $t \in T$, 该变量为已知分布的随机变量;

Q_{it} 为时段 t 货运站 i 处产生的运输任务总数,

$$Q_{it} = \sum_{j \in N} q_{ijt};$$

a_{ij} 为载货重车由货运站 i 发往 j 创造的收益,
 $i, j \in N$;

b_{ij} 为空驶车辆由货运站 i 发往 j 产生的成本,
 $i, j \in N$;

c_{ij} 为站内车辆排队装卸车作业的单位时间等待成本, $i \in N$;

x_{ijt} 为时段 t 由货运站 i 发往 j 的载货重车数, $i, j \in N, t \in T$;

y_{ijt} 为时段 t 由货运站 i 发往 j 的空驶车辆数, $i, j \in N, t \in T$;

V_{i1} 为计划周期初各货运站的车辆总数, 该变量值为已知;

V_{it} 为时段 t 货运站 i 处的车辆总数, $t \in T, t \geq 2$;

V_{it}^+ 为时段 t 到达货运站 i 处的重车数, $t \in T$;

V_{it}^- 为时段 t 到达货运站 i 处的空驶车数, $t \in T$;

λ_{it}^+ 为时段 t 货运站 i 处重车到达率, $t \in T, t \geq 2$,

$$\lambda_{it}^+ = \sum_{j \in N} x_{ijt} / \tau_t;$$

μ_{it}^+ 为时段 t 货运站 i 处卸货作业设备的卸载率,
 $t \in T, t \geq 2$;

m_{it}^+ 为时段 t 货运站 i 处卸货作业设备的数量,
 $t \in T, t \geq 2$;

ρ_{it}^+ 为时段 t 货运站 i 处卸车作业强度, $t \in T$,
 $t \geq 2, \rho_{it}^+ = \frac{\lambda_{it}^+}{m_{it}^+ \cdot \mu_{it}^+};$

l_{it}^+ 为时段 t 货运站 i 处重载车辆排队卸载队列的平均队长, $t \in T, t \geq 2$;

w_{it}^+ 为时段 t 货运站 i 处重载车辆排队卸载队列的平均逗留时间, $t \in T, t \geq 2$;

λ_{it}^- 为时段 t 货运站 i 处空车(包括空驶车和排空车)到达率, $t \in T, \lambda_{it}^- = \sum_{j \in N} (x_{ijt} + y_{ijt}) / \tau_i$;

μ_{it}^- 为时段 t 货运站 i 处装货作业设备的装载率, $t \in T$;

m_{it}^- 为时段 t 货运站 i 处装货作业设备的数量, $t \in T, t \geq 2$;

ρ_{it}^- 为时段 t 货运站 i 处装车作业强度, $t \in T, t \geq 2, \rho_{it}^- = \frac{\lambda_{it}^-}{m_{it}^- \cdot \mu_{it}^-}$;

l_{it}^- 为时段 t 货运站 i 处空车排队装载队列的平均队长, $t \in T$;

w_{it}^- 为时段 t 货运站 i 处空车排队装载队列的平均逗留时间, $t \in T$.

1.2 模型建立

以计划周期内总收益最大为目标, 建立问题的动态规划模型(DP模型):

$$\max F(X, Y) = \sum_{t=0}^H \sum_{i \in N} \left[\left(\sum_{j \in N} (a_{ij} x_{ijt} - b_{ij} y_{ijt}) \right) - c_i (V_{it}^+ w_{it}^+ + \min\{V_{it}, Q_{it}\} w_{it}^-) \right]. \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j \in N} (x_{ji(t-1)} / \tau_j) = \lambda_{it}^+; \quad (2)$$

$$\left[V_{i(t-1)} + \sum_{j \in N} (x_{ji(t-1)} + y_{ji(t-1)}) \right] / \tau_i = \lambda_{it}^-; \quad (3)$$

$$\rho_{it}^+ = \frac{\lambda_{it}^+}{m_{it}^+ \mu_{it}^+}; \quad (4)$$

$$\rho_{it}^- = \frac{\lambda_{it}^-}{m_{it}^- \mu_{it}^-}; \quad (5)$$

$$\left\{ \frac{(m_{it}^+ \rho_{it}^+)^{m_{it}^+} \rho_{it}^+}{m_{it}^+! (1 - \rho_{it}^+)^2} \left[\sum_{k=0}^{m_{it}^+ - 1} \frac{1}{k!} \left(\frac{\lambda_{it}^+}{\mu_{it}^+} \right)^k + \frac{1}{m_{it}^+} \frac{1}{1 - \rho_{it}^+} \left(\frac{\lambda_{it}^+}{\mu_{it}^+} \right)^{m_{it}^+} \right]^{-1} + \frac{\lambda_{it}^+}{\mu_{it}^+} \right\} / \lambda_{it}^+ = w_{it}^+; \quad (6)$$

$$\left\{ \frac{(m_{it}^- \rho_{it}^-)^{m_{it}^-} \rho_{it}^-}{m_{it}^-! (1 - \rho_{it}^-)^2} \left[\sum_{k=0}^{m_{it}^- - 1} \frac{1}{k!} \left(\frac{\lambda_{it}^-}{\mu_{it}^-} \right)^k + \frac{1}{m_{it}^-} \frac{1}{1 - \rho_{it}^-} \left(\frac{\lambda_{it}^-}{\mu_{it}^-} \right)^{m_{it}^-} \right]^{-1} + \frac{\lambda_{it}^-}{\mu_{it}^-} \right\} / \lambda_{it}^- = w_{it}^-; \quad (7)$$

$$\sum_{j \in N} (x_{ijt} + y_{ijt}) = V_{it}, \quad \forall i \in N; \quad (8)$$

$$\sum_{i \in N} x_{ijt} = V_{j(t+1)}^+, \quad \forall j \in N; \quad (9)$$

$$\sum_{i \in N} (x_{ijt} + y_{ijt}) = V_{j(t+1)}, \quad \forall j \in N; \quad (10)$$

$$Q_{it} = \sum_{j \in N} q_{ijt}; \quad (11)$$

$$x_{ijt} \leq q_{ijt}, \quad \forall i, j \in N, \quad \forall t \in T. \quad (12)$$

式(1)为目标函数, 式(2)~(11)为约束条件. 式(2)表示重载车辆卸载队列的到达率, 式(3)表示由空驶车辆和排空车辆共同组成的装货队列到达率, 式(4)表示卸载队列的作业强度, 式(5)表示装货队列的作业强度, 式(6)表示利用排队论公式计算出的卸载队列平均逗留时间, 式(7)表示利用排队论公式计算出的装货队列平均逗留时间, 式(8)表示时段 t 由站 i 发出的载货车辆和空驶车辆总数等于时段 t 站 i 处的车辆分布数, 式(9)表示时段 t 发往站 j 的载货车辆数构成时段 $t+1$ 站 j 处的卸载队列, 式(10)表示时段 t 发往站 j 的空驶车辆和重载排空车共同构成时段 $t+1$ 站 j 的装货队列, 式(11)表示时段 t 货运站 i 产生的运输任务数, 式(12)表示载货重车数不能超过产生运输任务数.

1.3 动态重构模型

引入车队调度方案对未来时段所造成的期望预期收益 $E[R_t(V_t, L_t)]$, 对模型进行重构如下:

$$\begin{aligned} \max F_t(V_t, Q_t) = & \sum_{i \in N} \left[\left(\sum_{j \in N} (a_{ij} x_{ijt} - b_{ij} y_{ijt}) \right) - c_i (V_{it}^+ w_{it}^+ + \min\{V_{it}, Q_{it}\} w_{it}^-) \right] + \\ & E[F_{t+1}(V_{t+1}, Q_{t+1})]. \end{aligned}$$

1) 单参数动态重构模型(RM-SDCP模型).

时段 $t+1$ 节点 j 处所创造的期望收益值 $E[F_{j,t+1}(V_{j,t+1}, Q_{j,t+1})]$ 等于该处各车辆所创造的期望收益值之和. 设计重构模型分解控制参数 $\pi_{j,t+1}$ 表示节点 j 处增加一辆车所引起的期望收益值增加量, 有

$$E[F_{j,t+1}(V_{j,t+1}, Q_{j,t+1})] = \pi_{j,t+1} V_{j,t+1}.$$

又因为

$$\sum_{i \in N} (x_{ijt} + y_{ijt}) = V_{j,t+1},$$

所以有

$$\begin{aligned} E[F_{j,t+1}(V_{j,t+1}, Q_{j,t+1})] = & \pi_{j,t+1} \sum_{i \in N} (x_{ijt} + y_{ijt}) = \\ & \sum_{i \in N} (\pi_{j,t+1} x_{ijt} + \pi_{j,t+1} y_{ijt}). \end{aligned}$$

由此可知

$$\begin{aligned} E[F_{t+1}(V_{t+1}, Q_{t+1})] = \\ \sum_{j \in N} E[F_{j,t+1}(V_{j,t+1}, Q_{j,t+1})] = \\ \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} (\pi_{j,t+1}^+ x_{ijt} + \pi_{j,t+1}^- y_{ijt}). \end{aligned}$$

将分解控制参数导入 DP 模型, 建立单参数动态重构模型 (RM-SDCP 模型) 如下:

$$\begin{aligned} F_t(V_t, Q_t) = \\ \sum_{i \in N} \left[\left(\sum_{j \in N} (a_{ij} x_{ijt} - b_{ij} y_{ijt}) \right) - \right. \\ \left. c_i \left(V_{it}^+ w_{it}^+ + \min\{V_{it}, Q_{it}\} w_{it}^- \right) \right] + \\ \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} (\pi_{j,t+1}^+ x_{ijt} + \pi_{j,t+1}^- y_{ijt}) = \\ \sum_{i \in N} \left\{ \left[\sum_{j \in N} \left((a_{ij} + \pi_{j,t+1}^+) x_{ijt} + \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. (-b_{ij} + \pi_{j,t+1}^-) y_{ijt} \right) - \right. \right. \\ \left. \left. c_i \left(V_{it}^+ w_{it}^+ + \min\{V_{it}, Q_{it}\} w_{it}^- \right) \right] \right\}. \quad (13) \end{aligned}$$

2) 双参数动态重构模型 (RM-DDCP 模型).

动态重构模型也可以采取双参数形式. 设计重车分解控制参数 $\pi_{j,t+1}^+$ 表示节点 j 处增加一辆重车所引起的期望收益值增加量, 空车分解控制参数 $\pi_{j,t+1}^-$ 表示节点 j 处增加一辆空车所引起的期望收益值增加量, 有

$$\begin{aligned} E[F_{j,t+1}(V_{j,t+1}, Q_{j,t+1})] = \\ \pi_{j,t+1}^+ V_{j,t+1}^+ + \pi_{j,t+1}^- V_{j,t+1}^-. \end{aligned}$$

又因为

$$\sum_{i \in N} x_{ijt} = V_{j,t+1}^+, \quad \sum_{i \in N} y_{ijt} = V_{j,t+1}^-$$

所以有

$$\begin{aligned} E[F_{j,t+1}(V_{j,t+1}, Q_{j,t+1})] = \\ \pi_{j,t+1}^+ \sum_{i \in N} x_{ijt} + \pi_{j,t+1}^- \sum_{i \in N} y_{ijt} = \\ \sum_{i \in N} (\pi_{j,t+1}^+ x_{ijt} + \pi_{j,t+1}^- y_{ijt}). \end{aligned}$$

由此可知

$$\begin{aligned} E[F_{t+1}(V_{t+1}, Q_{t+1})] = \\ \sum_{j \in N} E[F_{j,t+1}(V_{j,t+1}, Q_{j,t+1})] = \\ \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} (\pi_{j,t+1}^+ x_{ijt} + \pi_{j,t+1}^- y_{ijt}). \end{aligned}$$

将重车分解控制参数 $\pi_{j,t+1}^+$ 和空车分解控制参数 $\pi_{j,t+1}^-$ 导入 DP 模型, 建立双参数动态重构模型 (RM-

DDCP 模型) 如下:

$$\begin{aligned} F_t(V_t, Q_t) = \\ \sum_{i \in N} \left[\left(\sum_{j \in N} (a_{ij} x_{ijt} - b_{ij} y_{ijt}) \right) - \right. \\ \left. c_i \left(V_{it}^+ w_{it}^+ + \min\{V_{it}, Q_{it}\} w_{it}^- \right) \right] + \\ \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} (\pi_{j,t+1}^+ x_{ijt} + \pi_{j,t+1}^- y_{ijt}) = \\ \sum_{i \in N} \left\{ \left[\sum_{j \in N} \left((a_{ij} + \pi_{j,t+1}^+) x_{ijt} + \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. (-b_{ij} + \pi_{j,t+1}^-) y_{ijt} \right) - c_i \left(V_{it}^+ w_{it}^+ + \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. \min\{V_{it}, Q_{it}\} w_{it}^- \right) \right] \right\}. \quad (14) \end{aligned}$$

2 分解控制参数的实验设计获取方法

2.1 构建作用关系模型

2.1.1 基于 RM-SDCP 的单变量作用关系模型

将单货运站处车辆总供给量 V_{it} 作为系统输入, 单货运站处总收益值 F_{it} 作为系统输出, 从而单货运站处车辆收益系统形成一个单变量时变控制系统, 系统输入与输出之间存在作用关系 $F_{it} = g(V_{it})$. 当车辆总供给量小于运输任务量, 即 $V_{it} \leq q_{it}$ 时, 随车辆供给量 V_{it} 的增加, 收益值 F_{it} 呈递增趋势, 但增幅逐步递减; 当车辆供给量大于运输任务量, 即 $V_{it} > q_{it}$ 时, 随车辆供给量 V_{it} 增加, 收益值 F_{it} 呈递减趋势. 因此, 系统输入 V_{it} 与输出 F_{it} 之间呈非线性作用关系. 引入摄动参数 α_{it} 和扰动参数 β_{it} , 构建单变量幂函数作用关系 (SPF)、单变量指数函数作用关系 (SEF)、单变量对数作用关系 (SLF) 3 种单变量非线性作用关系模型 (SNF), 有

$$\begin{cases} F_t^{\text{SPF}} = \sum_{i \in N} F_{it} = \sum_{i \in N} [\alpha_{it} (V_i)^{\beta_{it}}], \\ F_t^{\text{SEF}} = \sum_{i \in N} F_{it} = \sum_{i \in N} [\alpha_{it} (\beta_{it})^{V_i}], \\ F_t^{\text{SLF}} = \sum_{i \in N} F_{it} = \sum_{i \in N} [\alpha_{it} \log_{\beta_{it}} (V_i)]. \end{cases} \quad (15)$$

2.1.2 基于 RM-DDCP 的双变量作用关系模型

将载货重车供给量 V_{it}^+ 和空驶车供给量 V_{it}^- 作为系统输入, 货运站总收益值 F_{it} 作为系统输出, 单货运站处车辆收益系统为双变量时变控制系统, 系统输入与输出之间存在作用关系 $F_{it} = g(V_{it}^+, V_{it}^-)$. 引入摄动参数 α_{it}^+ 、 α_{it}^- 和扰动参数 β_{it}^+ 、 β_{it}^- , 构建双变量幂函数作用关系 (BPF)、双变量指数函数作用关系 (BEF)、双变量对数作用关系 (BLF) 3 种双变量非线性作用关系模型 (BNF), 有

$$\begin{cases} F_t^{\text{BPF}} = \sum_{i \in N} F_{it} = \sum_{i \in N} [\alpha_{it}^+(V_i^+)^{\beta_{it}^+} + \alpha_{it}^-(V_i^-)^{\beta_{it}^-}], \\ F_t^{\text{BEF}} = \sum_{i \in N} F_{it} = \sum_{i \in N} [\alpha_{it}^+(\beta_{it}^+)^{V_i^+} + \alpha_{it}^-(\beta_{it}^-)^{V_i^-}], \\ F_t^{\text{BLF}} = \sum_{i \in N} F_{it} = \\ \sum_{i \in N} [\alpha_{it}^+ \log_{\beta_{it}^+}(V_i^+) + \alpha_{it}^- \log_{\beta_{it}^-}(V_i^-)]. \end{cases} \quad (16)$$

2.2 基于静态模型求解的实验设计方法

通过求解静态模型的实验方法获取车辆供给量-车站收益值时变控制系统的输入数据和输出数据, 步骤如下。

阶段1 初始化实验数据采样过程。

Step 1: 确定第1时段各货运站的初始车辆分布 V_{i1} 、任务数分布 $q_{ij1} (\forall i, j \in N)$;

Step 2: 计算第1时段各货运站空车到达率 λ_{i1}^- ;

Step 3: 根据装货作业设备的数量 m_i^- 、装货作业设备的装载率 μ_i^- , 计算第1时段各货运站装车作业强度 ρ_{i1}^- ;

Step 4: 计算第1时段各货运站空车排队装载队列的平均队长 l_{i1}^- 、平均逗留时间 w_{i1}^- ;

Step 5: 求解第1时段的车队调度方案 (x_{ij1}, y_{ij1}) , 并获得车站收益值 F_{i1} ;

Step 6: 记录第1时段各货运站的车辆数 V_{i1} 、任务数 Q_{i1} 、收益值 F_{i1} 数据。

阶段2 中间时段 ($t = 2, 3, \dots, H$) 实验数据采样过程。

Step 1: 利用式(10)计算第 t 时段各货运站的车辆分布 V_{jt} ;

Step 2: 利用式(9)计算第 t 时段各货运站的重车 V_{jt}^+ , 进而利用 $V_{jt} - V_{jt}^+$ 计算空车 V_{jt}^- ;

Step 3: 利用式(2)计算第 t 时段各货运站重车到达率 λ_{it}^+ , 根据卸货作业设备的数量 m_i^+ 、卸货作业设备的卸载率 μ_i^+ , 利用式(4)计算第 t 时段各货运站卸车作业强度 ρ_{it}^+ , 进而利用式(6)计算第 t 时段各货运站重车排队卸载队列的平均逗留时间 w_{it}^+ ;

Step 4: 利用式(3)计算第 t 时段各货运站空车到达率 λ_{it}^- , 根据装货作业设备的数量 m_i^- 、装货作业设备的装载率 μ_i^- , 利用式(5)计算第 t 时段各货运站装车作业强度 ρ_{it}^- , 进而利用式(7)计算第 t 时段各货运站空车排队装载队列的平均逗留时间 w_{it}^- ;

Step 5: 求解第 t 时段的车队调度方案 (x_{ijt}, y_{ijt}) , 并获得车站收益值 F_{it} ;

Step 6: 记录第 t 时段各货运站的车辆分布总数 V_{jt} 、重车数 V_{jt}^+ 、空车数 V_{jt}^- 、任务数 Q_{it} 、收益值 F_{it}

数据。

阶段3 获取建模样本集。

将对 H 个时段静态模型求解获取的输入数据和输出数据 $\{(V_{i1}, V_{i1}^+, V_{i1}^-, F_{i1}), (V_{i2}, V_{i2}^+, V_{i2}^-, F_{i2}), \dots, (V_{iH}, V_{iH}^+, V_{iH}^-, F_{iH}) | i \in N\}$ 作为实验点, 形成建模样本集。

阶段4 确定统计回归模型。

根据建模样本集, 结合作用关系模型, 拟合出作用关系模型中的摄动参数 α_{it} 、 α_{it}^+ 、 α_{it}^- 和扰动参数 β_{it} 、 β_{it}^+ 、 β_{it}^- , 得到具体的作用关系模型。

2.3 重构模型分解控制参数获取

2.3.1 基于SNF的分解控制参数获取

单变量作用关系模型(SNF模型)表示货运站收益值 F_{it} 与车辆供给量 V_{it} 之间的依存关系。SNF模型关于车辆供给量 V_{it} 的导数表示时段 t 货运站 i 处增加一辆车辆供给所取得的增量收益 $\pi_{i,t+1}$, 模型分解控制参数计算方法如下所示:

$$\begin{aligned} \pi_{i,t+1}^{\text{SPF}} &= \frac{\partial \sum_{i \in N} F_{it}}{\partial V_i} \Big|_{V_i=V_{i,t+1}} = \frac{\partial F_{it}}{\partial V_i} \Big|_{V_i=V_{i,t+1}} = \\ &= \frac{\partial (\alpha_{it} (V_i)^{\beta_{it}})}{\partial V_i} \Big|_{V_i=V_{i,t+1}} = \alpha_{it} \beta_{it} (V_{i,t+1})^{(\beta_{it}-1)}, \\ \pi_{i,t+1}^{\text{SEF}} &= \frac{\partial (\alpha_{it} (\beta_{it})^{V_i})}{\partial V_i} \Big|_{V_i=V_{i,t+1}} = \\ &= \alpha_{it} \ln(\beta_{it}) (\beta_{it})^{V_{i,t+1}}, \\ \pi_{i,t+1}^{\text{SLF}} &= \frac{\partial (\alpha_{it} \log_{\beta_{it}}(V_i))}{\partial V_i} \Big|_{V_i=V_{i,t+1}} = \\ &= \alpha_{it} \frac{\ln(V_{i,t+1})}{\ln(\beta_{it})}. \end{aligned} \quad (17)$$

2.3.2 基于BNF的分解控制参数获取

双变量作用关系模型(BNF模型)表示货运站收益值 F_{it} 与重车供给量 V_{it}^+ 、空车供给量 V_{it}^- 之间的依存关系。BNF模型关于重车供给量 V_{it}^+ 的偏导数表示时段 t 货运站 i 处增加一辆重车供给所取得的增量收益 $\pi_{i,t+1}^+$, 关于空车供给量 V_{it}^- 的偏导数表示时段 t 货运站 i 处增加一辆空车供给所取得的增量收益 $\pi_{i,t+1}^-$, 模型分解控制参数计算方法如下所示:

$$\begin{aligned} \pi_{i,t+1}^{\text{BPF},+} &= \frac{\partial \sum_{i \in N} F_{it}}{\partial V_i^+} \Big|_{V_i^+=V_{i,t+1}^+} = \frac{\partial F_{it}}{\partial V_i^+} \Big|_{V_i^+=V_{i,t+1}^+} = \\ &= \frac{\partial (\alpha_{it}^+ (V_i^+)^{\beta_{it}^+} + \alpha_{it}^- (V_i^-)^{\beta_{it}^-})}{\partial V_i^+} \Big|_{V_i^+=V_{i,t+1}^+} = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \alpha_{it}^+ \beta_{it}^+ (V_{i,t+1}^+)^{(\beta_{it}^+-1)}, \\
& \pi_{i,t+1}^{\text{BPF},-} = \\
& \frac{\partial F_t}{\partial V_i^-} \Big|_{V_i=V_{i,t+1}^-} = \frac{\partial \sum_{i \in N} F_{it}}{\partial V_i^-} \Big|_{V_i=V_{i,t+1}^-} = \\
& \frac{\partial (\alpha_{it}^+ (V_i^+)^{\beta_{it}^+} + \alpha_{it}^- (V_i^-)^{\beta_{it}^-})}{\partial V_i^-} \Big|_{V_i=V_{i,t+1}^-} = \\
& \alpha_{it}^- \beta_{it}^- (V_{i,t+1}^-)^{(\beta_{it}^- - 1)}, \\
& \pi_{i,t+1}^{\text{BEF},+} = \\
& \frac{\partial (\alpha_{it}^+ (\beta_{it}^+)^{V_i^+} + \alpha_{it}^- (\beta_{it}^-)^{V_i^-})}{\partial V_i^+} \Big|_{V_i^+=V_{i,t+1}^+} = \\
& \alpha_{it}^+ \ln(\beta_{it}^+) (\beta_{it}^+)^{V_{i,t+1}^+}, \\
& \pi_{i,t+1}^{\text{BPF},-} = \\
& \frac{\partial (\alpha_{it}^+ (\beta_{it}^+)^{V_i^+} + \alpha_{it}^- (\beta_{it}^-)^{V_i^-})}{\partial V_i^-} \Big|_{V_i^-=V_{i,t+1}^-} = \\
& \alpha_{it}^- \ln(\beta_{it}^-) (\beta_{it}^-)^{V_{i,t+1}^-}, \\
& \pi_{i,t+1}^{\text{BLF},+} = \\
& \frac{\partial (\alpha_{it}^+ \log_{\beta_{it}^+}(V_i^+) + \alpha_{it}^- \log_{\beta_{it}^-}(V_i^-))}{\partial V_i^+} \Big|_{V_i^+=V_{i,t+1}^+} = \\
& \alpha_{it}^+ \frac{\ln(V_{i,t+1}^+)}{\ln(\beta_{it}^+)}, \\
& \pi_{i,t+1}^{\text{BLF},-} = \\
& \frac{\partial (\alpha_{it}^+ \log_{\beta_{it}^+}(V_i^+) + \alpha_{it}^- \log_{\beta_{it}^-}(V_i^-))}{\partial V_i^-} \Big|_{V_i^-=V_{i,t+1}^-} = \\
& \alpha_{it}^- \frac{\ln(V_{i,t+1}^-)}{\ln(\beta_{it}^-)}. \tag{18}
\end{aligned}$$

3 仿真研究

设计由10个节点组成的运输网络,车队调度计划周期分35个时段,每个时段的长度为10~30个单位时间长度.载货重车收益为200元/车,空驶车辆成本为20元/车,站内车辆排队等待装卸车的单位时间成本为20元/单位时间,站内卸货作业设备数为均值5的正整数随机数,卸货作业设备卸载率为均值10的正整数随机数,装货作业设备数为均值5的正整数随机数,装货作业设备卸载率为均值6的正整数随机数.

3.1 模型的求解质量对比

为表明所提出方法的适用性,分别设计SPF、SEF、SLF、BPF、BEF、BLF作用关系分解控制参数实验,进而得到基于不同作用关系的分解控制参数 π^{SPF} 、 π^{SEF} 、 π^{SLF} 、 π^{BPF} 、 π^{BEF} 、 π^{BLF} ,并构建RM-SDCP模型和RM-DDCP模型,与传统DP模型进行对比.

图1为利用DP模型、基于SEF作用关系的RM-

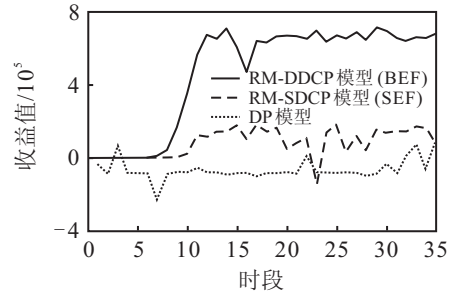


图1 求解质量对比(1)

SDCP模型、基于BEF作用关系的RM-DDCP模型对运输网络35个时段动态求解得到的收益值变化情况.由图1可见,基于BEF作用关系的RM-DDCP模型和基于SEF作用关系的RM-SDCP模型的求解质量高于传统DP模型的求解质量.

图2为利用DP模型、基于SPF作用关系的RM-SDCP模型、基于BPF作用关系的RM-DDCP模型对运输网络35个时段动态求解得到的收益值变化情况.由图2可见,基于BPF作用关系的RM-DDCP模型和基于SPF作用关系的RM-SDCP模型的求解质量高于传统DP模型的求解质量.

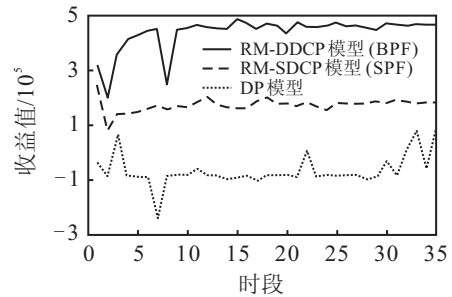


图2 求解质量对比(2)

图3为利用DP模型、基于SLF作用关系的RM-SDCP模型、基于BLF作用关系的RM-DDCP模型对运输网络35个时段动态求解得到的收益值变化情况.由图3可见,基于BLF作用关系的RM-DDCP模型和基于SLF作用关系的RM-SDCP模型的求解质量高于传统DP模型的求解质量.

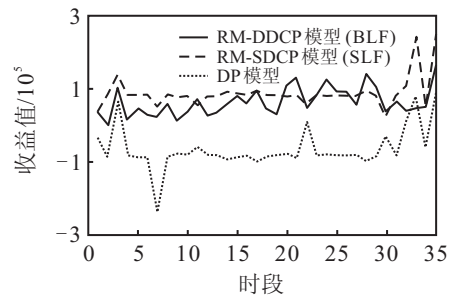


图3 求解质量对比(3)

3.2 模型的总体性能对比

为进一步提高不同模型的可比性,设计7种不同

规模的仿真实验, 各次仿真实验均采用平均卸车作业强度 $\bar{\rho}^+$ 、平均装车作业强度 $\bar{\rho}^-$ 、重载车辆排队卸载队列的平均逗留时间 \bar{w}^+ 、空车排队装载队列的平均逗留时间 \bar{w}^- 共 4 项指标.

表 1 为 RM-SDCP 模型、RM-DDCP 模型与 DP 模型的总体性能对比. 由表 1 可见, 在不同实验设计下, RM-DDCP 模型和 RM-SDCP 模型总体性能优于 DP 模型, RM-DDCP 模型总体性能优于 RM-SDCP 模型.

表 1 RM-SDCP 模型、RM-DDCP 模型与 DP 模型的总体性能对比

问题规模	指标	DP 模型	RM-SDCP 模型			RM-DDCP 模型		
			SEF	SPF	SLF	BEF	BPF	BLF
5 个节点 5 个时段	$\bar{\rho}^+$	0.613 8	0.612 5	0.616 1	0.613 1	0.612 8	0.614 2	0.364 2
	\bar{w}^+	0.062 9	0.061 1	0.061 2	0.064 1	0.061 0	0.062 5	0.061 3
	$\bar{\rho}^-$	1.113 1	1.098 9	1.101 2	1.103 7	1.098 0	1.110 9	0.859 9
	\bar{w}^-	0.128 0	0.106 4	0.110 0	0.159 2	0.106 1	0.107 4	0.108 5
5 个节点 10 个时段	$\bar{\rho}^+$	0.295 6	0.294 8	0.297 1	0.262 7	0.296 4	0.295 2	0.110 3
	\bar{w}^+	0.098 9	0.096 4	0.096 4	0.093 3	0.096 4	0.096 3	0.087 8
	$\bar{\rho}^-$	1.283 7	1.287 2	1.292 0	1.419 0	1.280 9	1.282 4	1.316 2
	\bar{w}^-	0.281 6	0.248 2	0.226 5	0.274 2	0.156 4	0.107 5	0.117 6
10 个节点 15 个时段	$\bar{\rho}^+$	0.438 6	0.431 6	0.432 5	0.432 1	0.431 3	0.431 8	0.169 8
	\bar{w}^+	0.042 9	0.042 0	0.042 4	0.105 9	0.041 3	0.042 2	0.042 2
	$\bar{\rho}^-$	0.892 9	0.890 1	0.893 6	1.019 1	0.889 6	0.891 5	0.892 4
	\bar{w}^-	0.189 3	0.175 1	0.152 1	0.136 1	0.118 3	0.093 7	0.107 7
10 个节点 20 个时段	$\bar{\rho}^+$	0.513 1	0.512 2	0.512 2	0.378 2	0.511 9	0.511 3	0.246 2
	\bar{w}^+	0.082 6	0.080 7	0.089 6	0.145 8	0.081 6	0.080 4	0.116 6
	$\bar{\rho}^-$	0.988 3	0.986 7	0.985 0	1.210 3	0.981 2	0.990 0	0.838 1
	\bar{w}^-	0.235 9	0.131 7	0.146 2	0.158 9	0.124 5	0.145 0	0.204 5
15 个节点 25 个时段	$\bar{\rho}^+$	0.457 9	0.458 0	0.456 6	0.162 2	0.456 7	0.428 1	0.161 2
	\bar{w}^+	0.162 6	0.085 1	0.060 8	0.101 3	0.066 6	0.066 8	0.099 9
	$\bar{\rho}^-$	0.596 7	0.590 6	0.601 1	0.855 2	0.588 3	0.588 2	0.578 3
	\bar{w}^-	0.259 8	0.257 2	0.242 5	0.168 7	0.235 3	0.219 9	0.163 4
15 个节点 30 个时段	$\bar{\rho}^+$	0.265 9	0.264 8	0.265 2	0.265 6	0.246 3	0.255 0	0.265 2
	\bar{w}^+	0.096 5	0.093 2	0.091 5	0.093 4	0.091 5	0.093 4	0.091 5
	$\bar{\rho}^-$	0.763 6	0.751 8	0.746 1	0.720 5	0.718 6	0.720 5	0.722 5
	\bar{w}^-	0.257 6	0.221 1	0.223 3	0.181 6	0.190 3	0.141 7	0.173 7
20 个节点 35 个时段	$\bar{\rho}^+$	0.289 1	0.282 8	0.222 4	0.289 2	0.209 0	0.201 2	0.255 3
	\bar{w}^+	0.098 8	0.099 1	0.095 4	0.098 8	0.096 9	0.095 4	0.095 5
	$\bar{\rho}^-$	1.056 8	1.049 8	0.823 7	0.505 0	1.040 9	0.958 3	1.056 8
	\bar{w}^-	0.195 6	0.166 4	0.178 1	0.182 3	0.146 9	0.141 6	0.167 4

4 结 论

本文研究了一类考虑站内作业协调的随机动态车队调度问题. 建立了问题的动态规划模型, 并对模型进行改进, 构建单参数动态重构模型与双参数动态重构模型, 设计 3 种基于单变量作用关系模型的分解控制参数获取方法和 3 种基于双变量作用关系模型的分解控制参数获取方法. 仿真分析表明, RM-SDCP 模型和 RM-DDCP 模型可以得到比传统 DP 模型更高质量的解. 为进一步提高不同模型的可比性, 设计了不同规模的仿真实验, 结果表明, RM-DDCP

模型和 RM-SDCP 模型总体性能优于 DP 模型, RM-DDCP 模型总体性能优于 RM-SDCP 模型.

参考文献(References)

[1] 侯玉梅, 贾震环, 田歆, 等. 带软时间窗整车物流配送路径优化研究[J]. 系统工程学报, 2015, 30(2): 240-250. (Hou Y M, Jia Z H, Tian X, et al. Research on the optimization on the vehicle logistics distribution with soft time windows[J]. J of Systems Engineering, 2015, 30(2): 240-250.)

- [2] 杨珍花, 赖平仲, 汤洋, 等. 冷藏车多车型混合配送调度优化[J]. 系统工程, 2015, 33(10): 28-36.
(Yang Z H, Lai P Z, Tang Y, et al. Mix distribution dispatch optimization by multi-type refrigerated trucks[J]. Systems Engineering, 2015, 33(10): 28-36.)
- [3] Battarra M, Erdogan G, Vigo D. Exact algorithms for the clustered vehicle routing problem[J]. Operations Research, 2014, 62(1): 58-71.
- [4] Xia J, Li K X, Ma H, et al. Joint planning of fleet deployment, speed optimization, and cargo allocation for liner shipping[J]. Transportation Science, 2015, 49(4): 922-938.
- [5] Koç Ç, Bekta T, Jabali O, et al. The fleet size and mix location-routing problem with time windows: Formulations and a heuristic algorithm[J]. European J of Operational Research, 2016, 248(1): 33-51.
- [6] Park S, Kim D S. Container fleet-sizing for part transportation and storage in a two-level supply chain[J]. J of the Operational Research Society, 2015, 66(9): 1442-1453.
- [7] 李冰. 多车型动态车队调度问题的算法设计及求解[J]. 系统管理学报, 2011, 20(4): 503-509.
(Li B. Algorithm for dynamic fleet scheduling with multiple vehicle types[J]. J of Systems & Management, 2011, 20(4): 503-509.)
- [8] 李冰, 轩华, 李静. 允许存储的变周期随机动态车队调度双层模型交替求解策略[J]. 控制与决策, 2015, 30(5): 807-814.
(Li B, Xuan H, Li J. Alternation solution the alternating solution strategies of bi-level programming model for the stochastic dynamic fleet scheduling problem with variable period and storage properties[J]. Control and Decision, 2015, 30(5): 807-814.)
- [9] Tierney K, Áskelsdóttir B, Jensen R M, et al. Solving the liner shipping fleet repositioning problem with cargo flows[J]. Transportation Science, 2015, 49(3): 652-674.
- [10] Ning S, Song H Q, Warren B P. The dynamic fleet management problem with uncertain demand and customer chosen service level[J]. Int J of Production Economics, 2014, 148(2): 110-121.
- [11] Meng Q, Wang S, Andersson H, et al. Containership routing and scheduling in liner shipping: overview and future research directions[J]. Transportation Science, 2014, 48(2): 265-280.
- [12] Meisel F, Bierwirth C. A framework for integrated berth allocation and crane operations planning in seaport container terminals[J]. Transportation Science, 2013, 47(2): 131-147.
- [13] Yang C H, Regan A C. A multi-criteria decision support methodology for implementing truck operation strategies[J]. Transportation, 2013, 40(3): 713-728.
- [14] Nair R, Miller-Hooks E. Fleet management for vehicle sharing operations[J]. Transportation Science, 2011, 45(4): 524-540.
- [15] Zhao J, Dessouky M, Bukkapatnam S. Optimal slack time for schedule-based transit operations[J]. Transportation Science, 2006, 40(4): 529-539.
- [16] 赵艳艳. 集装箱堆场作业优化模型与算法[J]. 交通科技与经济, 2013, 15(5): 43-45.
(Zhao Y Y. Model and algorithm for optimization of container yard operation[J]. Technology & Economy in Areas of Communications, 2013, 15(5): 43-45.)
- [17] 白紫熙, 周磊山, 王劲, 等. 基于拉格朗日的高速铁路车站作业优化[J]. 交通运输系统工程与信息, 2014, 14(4): 120-125.
(Bai Z X, Zhou L S, Wang J, et al. A lagrangian relaxation model for high-speed railway station operation optimization[J]. J of Transportation Systems Engineering & Information Technology, 2014, 14(4): 120-125.)
- [18] 边展, 徐奇, 靳志宏, 等. 考虑翻箱作业时出口箱堆场作业调度优[J]. 上海交通大学学报, 2014, 48(1): 146-153.
(Bian Z, Xu Q, Jin Z H, et al. Optimization of yard crane scheduling with consideration of export container relocation[J]. J of Shanghai Jiaotong University, 2014, 48(1): 146-153.)

(责任编辑: 郑晓蕾)